

XVI ERIAC
DECIMOSEXTO ENCUENTRO
REGIONAL IBEROAMERICANO DE CIGRÉ

17 al 21 de mayo de 2015



A1-26

Comité de Estudio A1 - Máquinas Eléctricas Rotativas

ANÁLISE DA CRITICIDADE DE ABALO SÍSMICO NO PROJETO DE LINHA DE EIXO DE TURBINAS FRANCIS VERTICAL ATRAVÉS DE ANÁLISE ESPECTRAL EM ELEMENTOS FINITOS.

T.T. MAZER*
Alstom
Brasil

F.A.S. ASSUMPÇÃO
Alstom
Brasil

F.H. GAION
Alstom
Brasil

L. BRAGA
Alstom
Brasil

R.S. DE LORENZI
Alstom
Brasil

S. LEAL
Alstom
Brasil

Resumen *– Neste trabalho serão apresentados resultados de análise espectral em elementos finitos, utilizados para análise de abalo sísmico sobre linha de eixo de turbinas Francis verticais. A metodologia empregada consiste em: definição da curva de resposta espectral (excitação), análise modal, análise espectral, fatores de participação, descrição dos resultados, e por fim será feita uma análise crítica dos esforços gerados pelo sismo, através da comparação com os esforços gerados em outros casos de carga extremos ao qual a linha de eixo é submetida, como por exemplo: curto-circuito de meia roda polar ou disparo da unidade geradora.*

O objetivo do trabalho é apresentar uma análise essencialmente teórica, baseada em resultados de cálculos dinâmicos em elementos finitos, o qual possibilita identificar claramente os fatores de participação de cada modo de vibrar da linha de eixo, e compor a resposta que a linha de eixo terá para aquele dado espectro. São consideradas excitações verticais e horizontais.

Como resultado do trabalho será possível avaliar a criticidade de um abalo sísmico face aos outros carregamentos extremos, nos projetos de linha de eixo analisados.

Palabras clave: Sismo, abalo sísmico, espectro, linha de eixo, turbina Francis, análise espectral, análise modal, análise dinâmica, elementos finitos, carregamentos extremos.

1 INTRODUÇÃO

Com objetivo de obter-se um aproveitamento da malha hidrológica para fins energéticos é comum que projetos hidrelétricos sejam instalados em regiões de atividade sísmica considerável. A maior parte dos países da América Latina está sujeita a tremores que podem atingir magnitudes consideráveis, como pode se observar nos mapas de perigo sísmico abaixo.

(*) Av. Charles Schneider, s/n˚ – CEP 12.040-001 Taubaté, SP – Brasil – e-mail: thiago.mazer@alstom.com

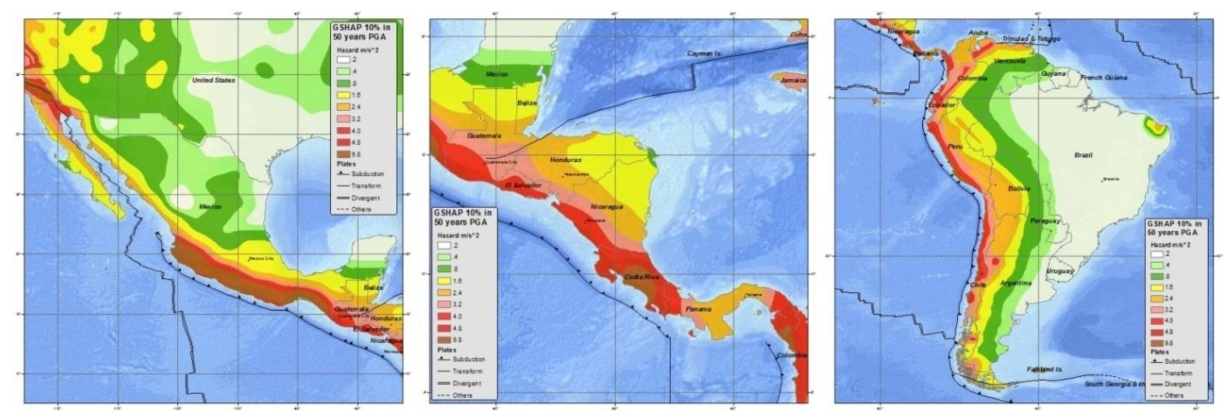


Fig. 1– Mapas de perigo sísmico, probabilidade de 10% em 50 anos, PGA, referência [4]

Para tanto é importante conhecer a influência destes efeitos sismológicos nos componentes mecânicos de um grupo gerador de uma usina hidrelétrica.

Primeiro é necessário conhecer quais os dados que estão disponíveis para a região onde será construído o empreendimento. Em geral esses dados são uma compilação de registros de sismógrafos, chamados acelerogramas. Para cada um deles é calculado o espectro de resposta para diversos sistemas de um grau de liberdade, considerando diferentes amortecimentos. Tendo diversas respostas de espectro, pode-se traçar um envelope que as engloba, chamado de espectro de projeto, para diferentes amortecimentos. De acordo com a referência [1]: “o espectro de projeto tem a intenção de ser representativo das características gerais para uma faixa razoável de movimentações de terreno esperadas em um dado local”. De acordo com a referência [5] “o espectro de projeto incorpora o espectro de diversos terremotos e representa uma espécie de resposta espectral “média” para projeto”.

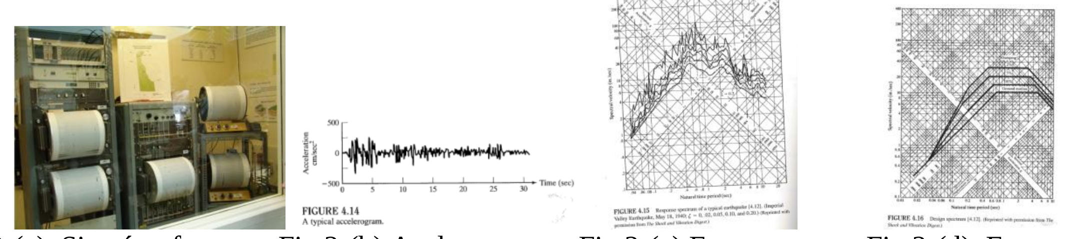


Fig.2-(a). Sismógrafos Fig.2-(b).Acelerograma Fig.2-(c) Esp. resposta Fig.2-(d). Esp. projeto

No próximo item serão apresentados três estudos de casos para linhas de eixo de turbinas Francis vertical, de diferentes quedas, para as quais os esforços gerados pelo sismo serão comparados aos esforços gerados em outros casos de carga extremos ao qual a linha de eixo é submetida, como por exemplo: curto-circuito de meia roda polar ou disparo da unidade geradora.

TABELA I. RESUMO DOS PROJETOS ESTUDADOS

Projeto	Potência [MW]	Queda [m]	Rotação [rpm]	Qtde. de Mancais Guia	Massa partes girantes [t]	Espectro de projeto
A	280	105	128.6	3	877	Espectro Específico
B	220	125	180.0	3	490	IEEE 693 (high)
C	310	200	180.0	2	680	PGA = 0.29g A(T=1s) = 0.19g

2 DESENVOLVIMENTO

A metodologia empregada consiste em:

• Definição da curva de resposta espectral (excitação): para definir a energia de excitação gerada por um abalo sísmico, deve-se associá-la a uma frequência, ou seja, a excitação deve ser definida por um espectro. Para os projetos A e B, os espectros de projeto foram definidos, a exceção foi o projeto C, para o qual foi utilizado método sugerido na referência [1]. Importante ressaltar que apenas o valor de pico de aceleração do solo (Peak Ground Aceleration – PGA), não fornece informação suficiente para definir a severidade do terremoto em termos de seu potencial de gerar dano a uma dada estrutura.

• Elaboração de modelo em elementos finitos da linha de eixo de cada projeto. Foram utilizados elementos de viga para discretizar os eixos, e elementos de massa nodal para simular o rotor do gerador e a roda da turbina.

• Análise modal: cálculo das frequências naturais e dos modos de vibrar (auto-valores e auto-vetores).

• Análise espectral: a partir do espectro de projeto e dos fatores de participação são calculados os vetores de resposta, para cada direção, e posteriormente é feita a composição dos resultados através do método SRSS, raiz da soma dos quadrados. Esta análise será detalhada nos estudos de caso a seguir. Nesta etapa também é feita a combinação para levar em conta a ação do sismo nas duas direções do plano horizontal (X e Y) e na direção vertical (Z).

2.1 Objetivos

O objetivo do trabalho é apresentar uma análise essencialmente teórica, baseado em resultados de cálculos dinâmicos em elementos finitos, o qual possibilita identificar claramente os fatores de participação de cada modo de vibrar da linha de eixo, e compor a resposta que a linha de eixo terá para aquele dado espectro. São consideradas excitações verticais e horizontais. As excitações são consideradas do tipo “single point”, ou seja, é considerado que todos os mancais se deslocam em conjunto (mesma frequência, fase e amplitude).

2.2 Estudos de caso

2.2.1 Projeto A

Para o projeto A, foi informado o espectro de projeto específico para o local de construção da usina, conforme gráfico abaixo.

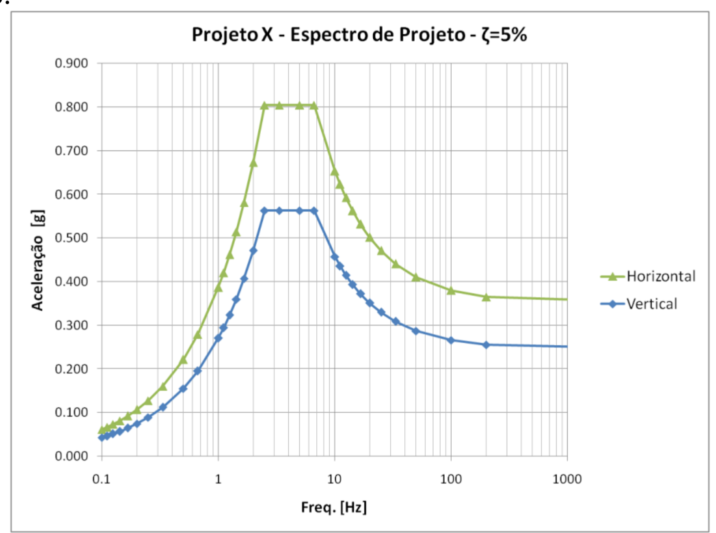


Fig.3 – Espectro de projeto para projeto A

Para este projeto foi especificado amortecimento (ζ) de 5%. Para os demais projetos foi adotado amortecimento de 4%. Quanto menor o amortecimento, mais elevado é o patamar de aceleração máxima.

O modelo em elementos finitos foi construido com o programa ANSYS v14.5, com elementos de viga (BEAM188) para o eixo, elementos de mola (COMBIN14) para simular os mancais e a atração magnética entre rotor e estator do gerador, e elementos de massa (MASS21) para os rotores do gerador e turbina.

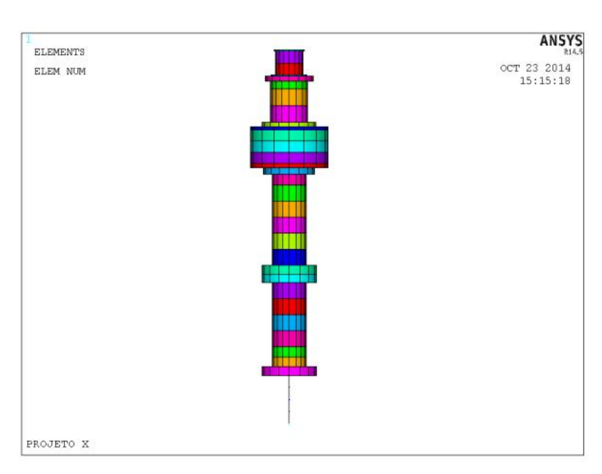


Fig.4 - Modelo Elementos Finitos, Projeto A

Com o modelo pronto, é realizada a análise modal onde são calculadas as frequências naturais e os seus respectivos modos de vibrar, para simplificar a análise os efeitos giroscópicos não foram considerados. O número de modos deve ser amplo, para cubrir pelo menos 90% de massa efetiva nas 3 direções. Os dois primeiros modos de flexão em geral são os mais afetados pela aceleração lateral, conforme ilustrações abaixo.

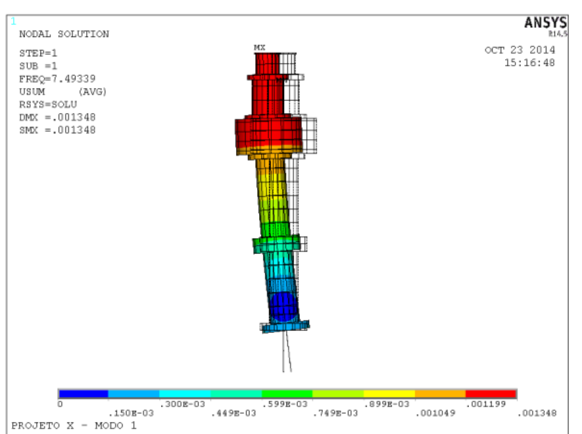


Fig.5-(a). primeiro modo flexão a 7.49Hz

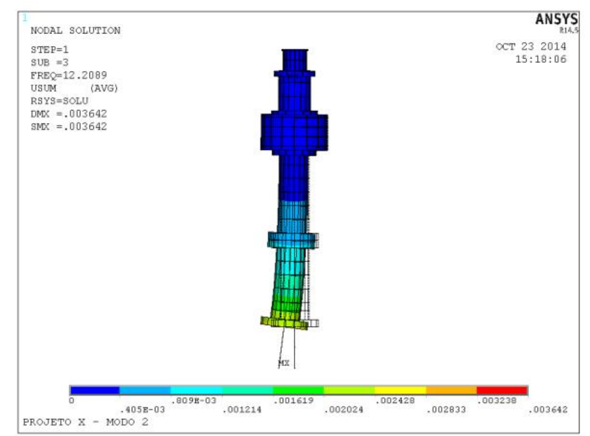


Fig.5-(b). segundo modo a 12.21Hz

Pode ser visto que o primeiro modo é devido ao movimento lateral do rotor do gerador, devido a sua maior massa, e o segundo modo devido ao movimento lateral da roda da turbina.

Em seguida é realizada a análise espectral, que consiste em calcular para cada direção (X, Y e Z) e para cada modo i:

- o fator de participação (partic. factor): γ_i

$$\gamma_i = \{\varphi\}_i^T \cdot [M] \cdot \{D\}$$

Onde:

$\{\varphi\}_i^T$ é o auto-vetor do modo i, transposto (o auto-vetor deve ser normalizado)
[M] é a matriz de massa
{D} é o vetor que representa a direção da excitação

- o coeficiente modal (mode coef.): Ai

$$A_i = \frac{SV_i \cdot \gamma_i}{\omega_i^m}$$

Onde:

SV_i é o valor da aceleração do espectro para a frequência correspondente ao modo i
wi é a frequência natural correspondente ao modo i
m = 2 para aceleração como dado de entrada no espectro de projeto.

- vetor resposta: {R}i

$$\{R\}_i = \omega_i^m \cdot A_i \cdot \{\varphi\}_i$$

Os cálculos acima são feitos pelo programa de elementos finitos, que também faz a composição das respostas em diferentes frequências em uma única resposta. O método de composição escolhido foi o da raiz quadrada da soma dos quadrados (SRSS), que é tido como um método conservador, pois leva em conta todos os modos, independente se estão com frequências naturais próximas ou não. Este método não é indicado quando as frequências naturais estão próximas, em cerca de 10%, o que não é o caso aqui. Quando existe essa proximidade de frequências entre diferentes modos de vibrar, outros métodos podem ser aplicados como: CQC e ROSE.
A tabela abaixo ilustra a participação dos primeiros modos com relação a uma aceleração na direção Y (no plano horizontal). Percebe-se que os dois primeiros modos cobrem 99.6% da massa acumulada, o que significa que a resposta na direção Y depende basicamente destes dois modos.
Notar que na tabela estão indicados modos em pares ortogonais, ou seja, os modos 1 e 2 correspondem ao modo 1 (7.49Hz), e os modos 3 e 4 ao modo 2 (12.21Hz). Cada par de modos tem fator de participação iguais, pois ambos estão a 45 graus com relação ao eixo Y.

TABELA II. RESUMO DO CÁLCULO ESPECTRAL

***** RESPONSE SPECTRUM CALCULATION SUMMARY ******

MODE	FREQUENCY	SV	PARTIC.FACTOR	MODE COEF.	M.C. RATIO	EFFECTIVE MASS	CUMULATIVE MASS FRACTION
1	7.493	7.4344	538.9	1.807	1.000000	290362.	0.367910
2	7.493	7.4344	538.9	1.807	0.999999	290362.	0.735820
3	12.21	5.9674	320.4	0.3249	0.179783	102647.	0.865882
4	12.21	5.9674	320.4	0.3249	0.179784	102649.	0.995946
5	14.35	5.6336	-0.1587E-12	-0.1100E-15	0.000000	0.251969E-25	0.995946
6	17.61	5.2374	0.8688	0.3716E-03	0.000206	0.754898	0.995947
7	30.68	4.4789	34.42	0.4149E-02	0.002296	1185.04	0.997449
8	30.68	4.4789	-34.42	-0.4149E-02	0.002296	1185.06	0.998950

O deslocamento e a tensão equivalente da resposta composta podem ser visualizados nas imagens abaixo.

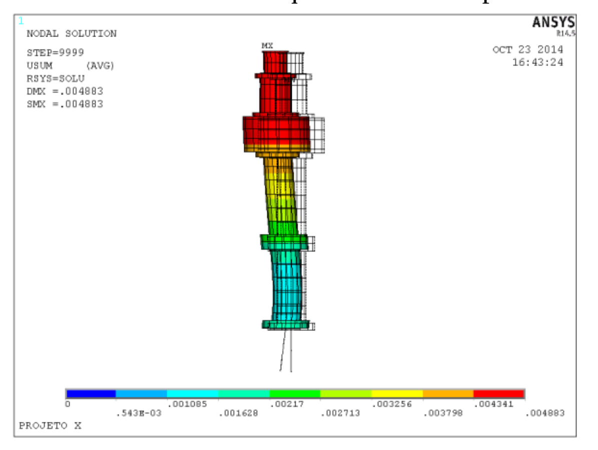


Fig.1-(a). deslocamento [m]

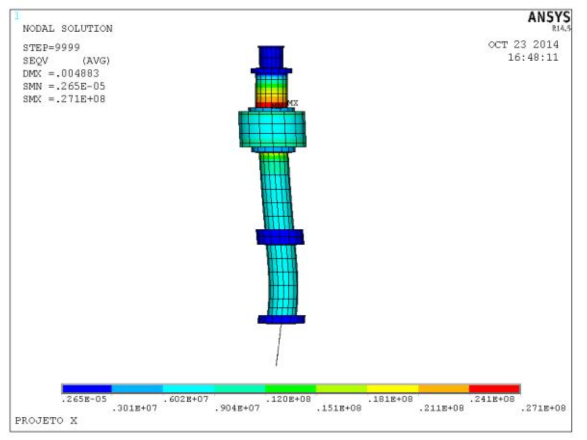


Fig.6-(b). tensão equivalente [Pa]

2.2.2 Projeto B

Para o projeto B, a especificação técnica do cliente solicitava utilizar a norma IEEE 693, referência [2]. Esta norma, é destinada a equipamentos de subestações e apresenta dois espectros: intensidade alta (PGA=0.5g) e intensidade moderada (PGA=0.25g). A análise foi feita com o espectro de intensidade alta, considerando amortecimento de 4%.

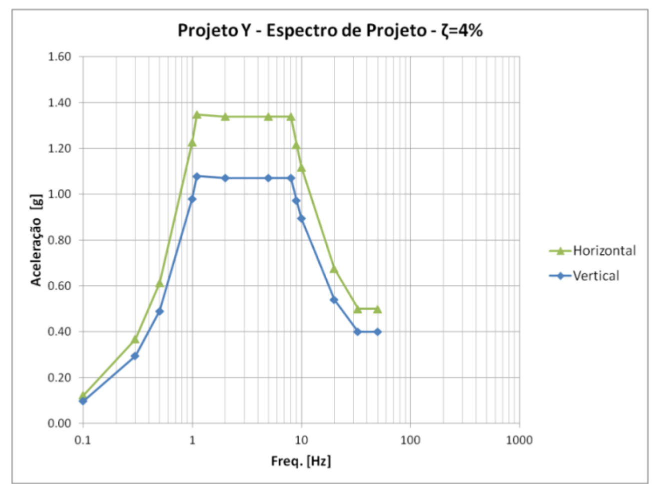


Fig.7–Espectro de projeto, conforme IEEE 693, referência [2]

O modelo foi elaborado da mesma maneira que o projeto A. O método de cálculo também foi o mesmo, com exceção o espectro de projeto adotado. As imagens abaixo ilustram os resultados obtidos em termos de deslocamento e tensão equivalente.

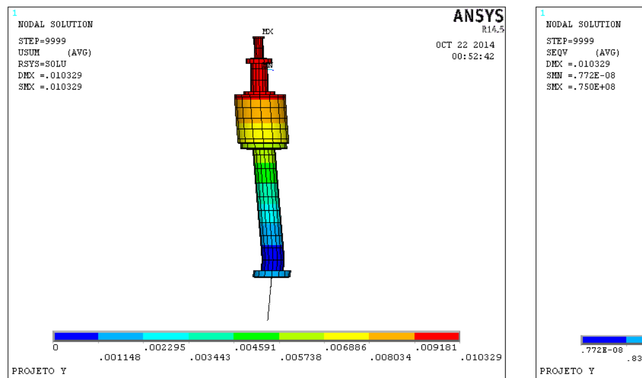


Fig.8-(a). deslocamento [m]   Fig.8-(b). tensão equivalente [Pa]

2.2.3 Projeto C

Para o projeto C, não há um espectro específico do local de construção e também não foi indicada uma norma de referência, tendo apenas o valor de pico de aceleração do solo (Peak Ground Aceleration – PGA), e a aceleração para o período de 1s (A(T=1s)). Através da metodologia exposta na referência [1], é possível determinar um espectro de projeto padrão, que foi adotado para análise.

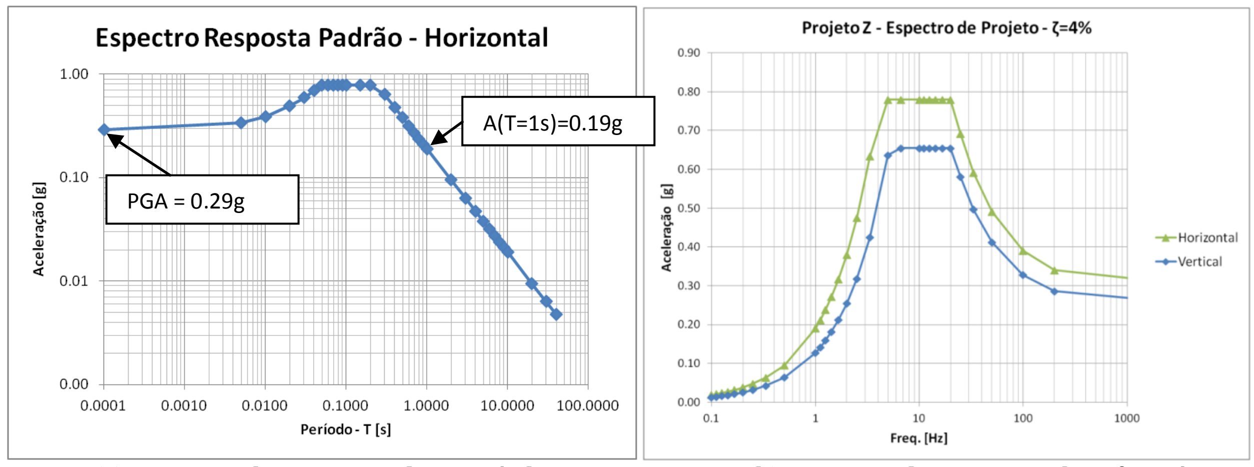


Fig. 9-(a). espectro de projeto padrão período   Fig.9-(b). espectro de projeto padrão frequência

O modelo foi elaborado da mesma maneira que o projeto A. O método de cálculo também foi o mesmo, com exceção o espectro de projeto adotado. As imagens abaixo ilustram os resultados obtidos em termos de deslocamento e tensão equivalente.

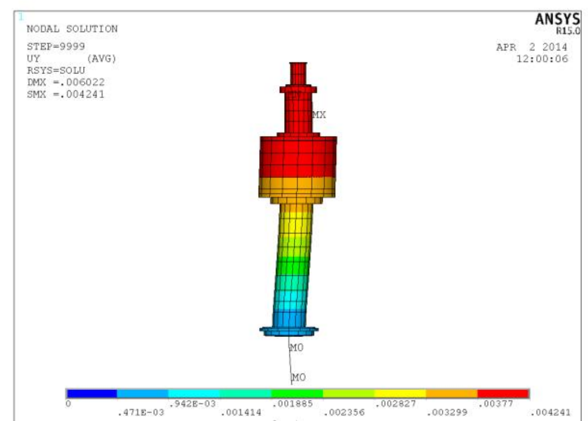




Fig.112-(a). deslocamento [m]

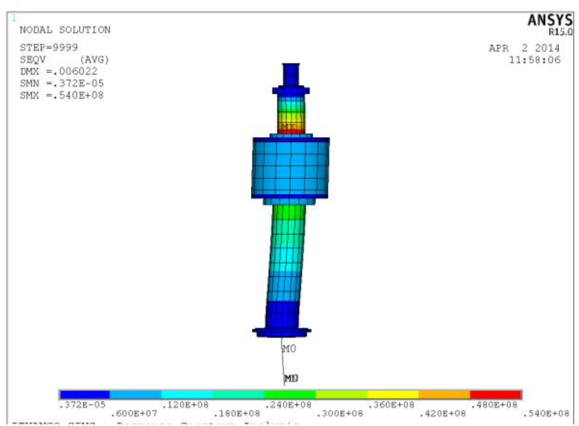


Fig.11-(b).tensão equivalente [Pa]

2.3 Resumo dos resultados obtidos

Os deslocamentos máximos (USUM) e tensão equivalente (Seq) devido ao sismo estão resumidas na tabela a seguir.

TABELA III. RESUMO DOS RESULTADOS DE DESLOCAMENTO E TENSÃO EQUIVALENTE PARA O CASO DE SISMO

PROJETO	USUM [m]	Entreferro [m]	USUM / Entreferro	Seq [Pa]	YS [Pa]	Seq / YS
A	4.883E-03	2.10E-02	23%	2.71E+07	2.95E+08	9%
B	1.033E-02	2.20E-02	47%	7.50E+07	2.95E+08	25%
C	4.241E-03	2.85E-02	15%	5.40E+07	2.95E+08	18%

Os resultados de deslocamento mostram uma grande movimentação da parte superior da linha de eixo onde está localizado o gerador. Esse deslocamento foi comparado com o entreferro entre rotor e estator do gerador. Percebe-se que mesmo nesse caso acidental, de baixa probabilidade, o deslocamento não seria suficiente para conduzir ao toque do rotor no estator.

Para os resultados de tensão, percebe-se que a transição do flange do eixo superior é o ponto crítico durante o abalo sísmico para os 3 casos estudados. Em todos eles, o incremento de tensão equivalente não foi superior à 25% do escoamento do material (YS). Para a linha de eixo de turbinas hidráulicas é comum adotar como critério 1/3 YS para o caso normal e o valor de 2/3 YS ou superior para casos excepicionais, como um disparo por exemplo. Portanto, em nenhum dos 3 projetos estudados, foi necessário alterar o material ou modificar a dimensão do eixo em função do sismo.

Os esforços atuantes nos mancais da linha de eixo estão resumidos na tabela abaixo:

TABELA IV. RESUMO DAS REAÇÕES NOS MANCAIS PARA O CASO DE SISMO

Projeto	Somente Sismo		
	Reações nos mancais [kN]		
	Sup.	Interm.	Inf.
A	3905	3909	1618
B	4911	6167	131
C	5208	-	2220

2.3.1 Comparativo com outros casos de carga

A tabela anterior resume as reações nos mancais geradas pela ação exclusiva do sismo. Por hipótese, considera-se que a máquina está em operação normal no momento em que o sismo ocorre, portanto as reações nos mancais para operação normal são acrescentadas.

TABELA V. COMPARATIVO DE REAÇÕES NOS MANCAIS

Projeto	**Op. Normal + Sismo**			**max {CC 1/2 Pólos; Rejeição; Disparo}**			**Sincronismo+Sismo / max {CC 1/2 Pólos; Rejeição; Disparo}**		
	Reações nos mancais [kN]			**Reações nos mancais [kN]**					
	Sup.	**Interm.**	**Inf.**	**Sup.**	**Interm.**	**Inf.**	**Sup.**	**Interm.**	**Inf.**
A	4410	4252	2123	3020	2900	1270	1.46	1.47	1.67
B	5386	6770	447	2580	3350	871	2.09	2.02	0.51
C	5541	-	2642	4060	-	2090	1.36	-	1.26

Os valores de reação nos mancais para o caso de sismo são superiores quando comparados com os demais casos extremos e excepcionais, nos três projetos estudados. Em termos práticos, essa reação não deve ser utilizada para dimensionar os mancais, no que tange à sua lubrificação. No entanto, as estruturas que suportam os mancais, como: cruzetas e tampas superiores; devem resistir a esse carregamento extremo, respeitando os devidos critérios de dimensionamento correspondentes a condição extrema. Pela experiência que tivemos, não foi necessário modificar os projetos em questão em função dos esforços calculados para a condição de sismo, principalmente porque as estruturas em questão são dimensionadas para prover rigidez, sendo que as tensões atuantes são relativamente baixas.

2.3.2 Observações sobre estruturas rígidas de frequencia natural elevada

No dimensionamento de uma linha de eixo, é prática comum manter a primeira frequência natural com uma margem de pelo menos 15% sobre a máxima velocidade que a turbina pode atingir (velocidade de disparo). Portanto para linha de eixo de turbinas hidráulicas, existe uma grande probabilidade, de pelo menos a primeira frequência natural se encontrar na faixa de 2 à 20Hz, onde em geral, os espectros de projeto apresentam acelerações maiores. Favor consultar as figuras de espectro de projeto do item 2.2.

No entanto, se a estrutura for rigida e apresentar frequências acima de 33Hz, pode-se considerar que ela irá acompanhar a aceleração do solo, e portanto, o valor do PGA pode ser considerado como uma aceleração agindo no centro de massa do componente, simplificando a análise para uma análise estática. Essa consideração é feita pela norma IEEE 693, referência [2], no item 6.2.1.

3 CONCLUSÃO

Para definir a severidade do terremoto em termos de seu potencial de gerar dano a uma dada estrutura é necessário saber o espectro de projeto para o determinado local de construção. Na ausência de espectro de projeto específico, pode-se utilizar espectro de projeto padrão, que pode ser construído a partir de apenas alguns dados como PGA e aceleração para período de 1s, por exemplo.

As análises espectrais das linhas de eixo estudadas mostram que o sismo é capaz de produzir esforços significativos e até superiores a outros casos extremos como curto circuito de ½ dos pólos. Para projetos de turbinas hidráulicas que apresentam a condição de sismo, estudos similares a este podem ser feitos para determinar a criticidade do sismo. No entanto, em nenhum dos projetos estudados foi necessário alterar as estruturas que suportam os mancais, principalmente porque essas estruturas são dimensionadas para prover rigidez.

Para os eixos, os deslocamentos são significativos principalmente na região do rotor do gerador, onde se concentra a maior parcela de massa. O máximo deslocamento total foi 10mm para o projeto B, que corresponde à 43% do entreferro. O incremento de tensão equivalente devido ao sismo é inferior à 25% do escoamento do material, enquanto que o acréscimo no critério para tensão é , em geral, 33%. Portanto, o caso de abalo sísmico não traz impactos no dimensionamento dos eixos dos projetos A, B e C.

Para estruturas rígidas, que possuam frequências naturais superiores à 33Hz, o valor de pico de aceleração do solo (PGA) pode ser utilizado em uma análise estática simples, para o dimensionamento do componente e de seus suportes.

4 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] E.E. Matheu, D.E. Yule, R.V. Kala, “Determination of Standard Response Spectra and Effective Peak Ground Accelerations for Seismic Design and Evaluation”, US Army Corps of Engineers, 2005.

[2] IEEE 693 “Recommended Practice for Seismic Design of Substations”, 2005.

[3] S.S. Rao, *Mechanical Vibrations*, 4ªed., Pearson Prentice Hall, 2003.

[4] United States Geological Survey´s web site: http://earthquake.usgs.gov/

[5] M. Paz, *Structural Dynamics, Theory and Computation*, 3ªed., Van Nostrand Reinhold, 1991.